第40卷 第9期
2023年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 9
Sep. 2023

新疆草地时空动态及其对气候变化的响应
——以昌吉回族自治州为例

陈春波[1,2]， 李均力[1,2]， 赵 炎[3]， 夏 江[3]， 田伟涛[3]， 李超锋[4]

（1. 荒漠与绿洲生态国家重点实验室，干旱区生态安全与可持续发展重点实验室，中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 干旱区草地生态系统遥感监测实验室，新疆 乌鲁木齐 830049；3. 昌吉州草原站，新疆 昌吉 831100；4. 瑞昶设计院有限公司，新疆 乌鲁木齐 830049）

摘 要：基于MODIS NPP、EVI遥感影像，采用MVC法、一元线性回归法与Pearson相关分析法，探讨天山北坡昌吉州草地植被时空动态及其对同期气温、降水的响应。结果表明：2000—2020年，草地植被NPP、EVI均为跃动式显著递增，2016年后呈逐年递减；NPP、EVI多年均值为0.095 kg C·m^{-2}、0.186；相较于2000年（NPP=0.077 kg C·m^{-2}、EVI=0.166），2020年NPP（0.099 kg C·m^{-2}）、EVI（0.194）分别增长了28.57%、16.87%。草地NPP空间异质性显著增加并呈扩大趋势，EVI空间差异逐年递增，变化范围分别为0.038 kg C·m^{-2}（NPP）、0.059（EVI）。在空间上，NPP、EVI多年平均分布具有差异；总体上，NPP、EVI随海拔升高而增加，但绿洲边缘、古尔班通古特沙漠南缘分布有高位EVI，面积占比65.01%的NPP与21.93%的EVI显著递增。9种草地类型植被NPP、EVI与降水呈显著正相关的面积占比远大于同期气温，不同类型草地对降水的响应具有差异。降水是草地植被的重要影响因子，但高海拔区域的适度增温有益于草地植被生长。

关键词：草地；短命植物；暖湿化；MODIS NPP；MODIS EVI；时空动态；天山北坡

草地约占陆地总面积的50%以上，为地球表面分布最广的生态系统类型，是我国重要的陆地生态系统[1]。草地不仅是畜牧业重要的生产基地与草原文化传承的载体[2]，而且是干旱区重要的生态屏障，具有生产、调节、支撑、文化功能，在维持生态安全、可持续发展与人类福祉方面发挥着积极作用[3]。新疆天山北坡经济带位于天山以北、准噶尔盆地南缘，是建设“一带一路”的核心区域；近半个世纪，气候变化与大规模水土开发导致天山北坡土地荒漠化（退化、沙化与盐渍化）程度加剧，尤其草地退化形势严峻[4]。

近年来，随着“星-空-地”一体化监测在草地生态中的逐步应用，国内诸多学者针对天山北坡草地开展了研究。孙智斌等[5]、张雅等[6]、陈佼等[7]、吐尔逊·艾山等[8]采用空天遥感技术量化了天山北坡草地生物量、植被覆盖度与净初级生产力；王永琪等[9]、胡贵锋等[10]、杨晶晶等[11]、张青青等[12]、孙霞等[13]、丁娓等[14]分别研究了放牧活动对天山北坡草地生态系统生物量、土壤有机碳及其微生物活性的影响；董乙强等[15]、胡毅等[16]、范燕敏等[17]、哈里·阿力腾别克等[18]分析了短期禁牧、围栏封育对天山北坡草地生态系统群落、碳储量以及碳氮交换的影响；杨峰等[19]、顾爱星等[20]、Liu等[21]探讨了天山北坡草地退化的特征与成因及其退化草地土壤环境与微生物的关系。目前，关于天山北坡草地的研究已有一些成果，但针对天山北坡昌吉回族自治州（本研究简称“昌吉州”）的草地研究较少，尤其是长时序列的草地时空变化；昌吉州位于天山北坡中东段，草

收稿日期：2023-03-23； **修订日期**：2023-05-04

基金项目：2020年自治区创新环境（人才、基地）建设专项-自然科学计划（自然科学基金）青年科学基金项目（2020D01B57）；天山英才科技创新团队（2022TSYCTD0006）；第三次新疆综合科学考察项目（2021XJKK1403）；2022年中央财政林业草原（草原生态修复治理补助）技术支撑项目（XJCYZZ202201）；2021年中央财政林业草原生态保护恢复资金（草原生态修复治理补助）项目（XJ-CYZZ202104）；2020年第一批中央财政林业草原生态保护恢复资金（草原生态修复治理补助）项目（XJCYZZ202001）；新疆维吾尔自治区草原总站草原生态修复治理补助监测及科技支撑项目（XJCYZZ202001）

作者简介：陈春波（1985-），男，助理研究员，主要从事干旱区草地生态健康智能监测、评估与预警. E-mail: ccb_8586@ms.xjb.ac.cn

通讯作者：夏江. E-mail: 820203523@qq.com

地分布具有垂直地带性,是研究天山北坡草地的典型区域,具有重要的示范与推广价值。

本研究选择天山北坡昌吉州为研究区域,以天然草地为研究对象,采用MODIS净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)开展时空动态及其对气候变化响应的分析,该数据集时间跨度2000—2020年,空间分辨率0.5 km,时间分辨率16 d。分别以NPP、EVI作为草地植被重要表征,分析草地植被NPP、EVI的时序变化、空间格局与异质性,定量草地NPP、EVI与同期气温、降水的相关关系,并开展显著性检验,为昌吉州以及各市县行政区划的草地生态健康与退化评估及其草地高质量发展提供理论参考。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

昌吉州(43°20′~45°00′N, 85°17~′91°32′E)位于天山北麓、准噶尔盆地东南缘,是建设"丝绸之路"经济带核心区域的重要组成部分。地形由东南向西北倾斜,由南向北依次为山地、冲积平原与盆地。气候类型属于温带大陆性气候,冬季寒冷、夏季炎热、昼夜温差大以及蒸散发剧烈;多年平均气温6.8 ℃,1月均温-15.6 ℃,7月均温24.5 ℃;多年平均降水190 mm,降水量夏季高于冬季。昌吉州可利用的天然草地面积约5.20×10^6 hm²(占全州总面积的2/3),总计9个大类、26个亚类、232个组和484个型,主要包括:高寒草原类、高寒草甸类、山地草甸类、温性草甸草原类、温性草原类、温性荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性荒漠类与低平地草甸类[22-23](图1)。

1.2　数据来源与预处理

本研究源数据为MODIS卫星影像、天然草地分类与新疆行政区划。MODIS数据(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/)包括NPP、EVI,时间分辨率16 d,空间分辨率0.5 km。天然草地分类来自新疆维吾尔自治区草原总站。气温、降水(2000—2020年)来自资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。研究中采用C++、Python等编程语言,结合GDAL、Arcpy、Numpy、Matplotlib等语言包开展了数据预处理、分析及可视化。

1.3　研究方法

1.3.1　最大化合成法与描述性统计方法　在格网尺度,采用最大化合成法[24](Maximum Value Composites, MVC)计算年尺度昌吉州草地植被EVI(2000—2020年),代表草地年度最佳生长状况;采用累计法计算年尺度草地植被NPP(2000—2020年),代表草地年内累计的有机物总量。在昌吉州及其各草地类型尺度,统计并输出年度草地植被NPP、EVI平均值等,分别逐年计算草地NPP、EVI的标准差,表征昌吉州、各类型草地植被NPP、EVI的空间异质性变化及其尺度差异。

1.3.2　草地植被时序变化趋势　基于像元的NPP、EVI年际变化率表征草地植被的变化趋势,拟通过一元线性回归计算草地植被NPP、EVI的时序变化[25],以EVI为例计算公式如下:

$$Slope=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times EVI_i)-\sum_{i=1}^{n}i\times\sum_{i=1}^{n}EVI_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{b}i\right)^2}\qquad(1)$$

式中:n为时间跨度,n=21;i为研究年份序号;EVI_i

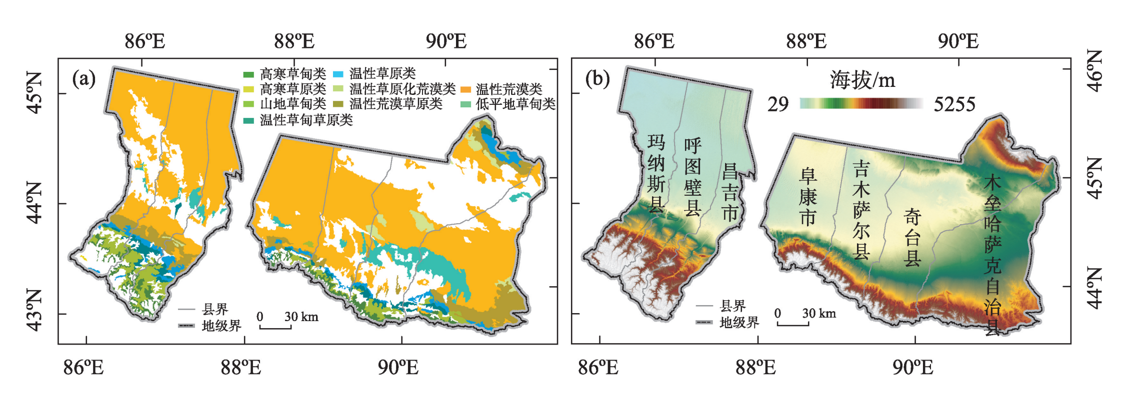


图1　研究区域概况

Fig. 1　Overview of the research area

为i年草地植被EVI值。*Slope*为草地植被EVI变化倾向率[26]，当*Slope*>0，表示草地植被EVI呈增加趋势，当*Slope*=0，表示变化不明显，当*Slope*<0，表示减少趋势。本研究涉及的草地植被变化趋势采用F检验。

1.3.3 相关性分析法 为量化草地NPP、EVI与同期气候因子（气温、降水）的相关性，拟采用Pearson相关性分析方法定量草地植被NPP、EVI与同期气温、降水的相关关系[26-27]，计算公式如下：

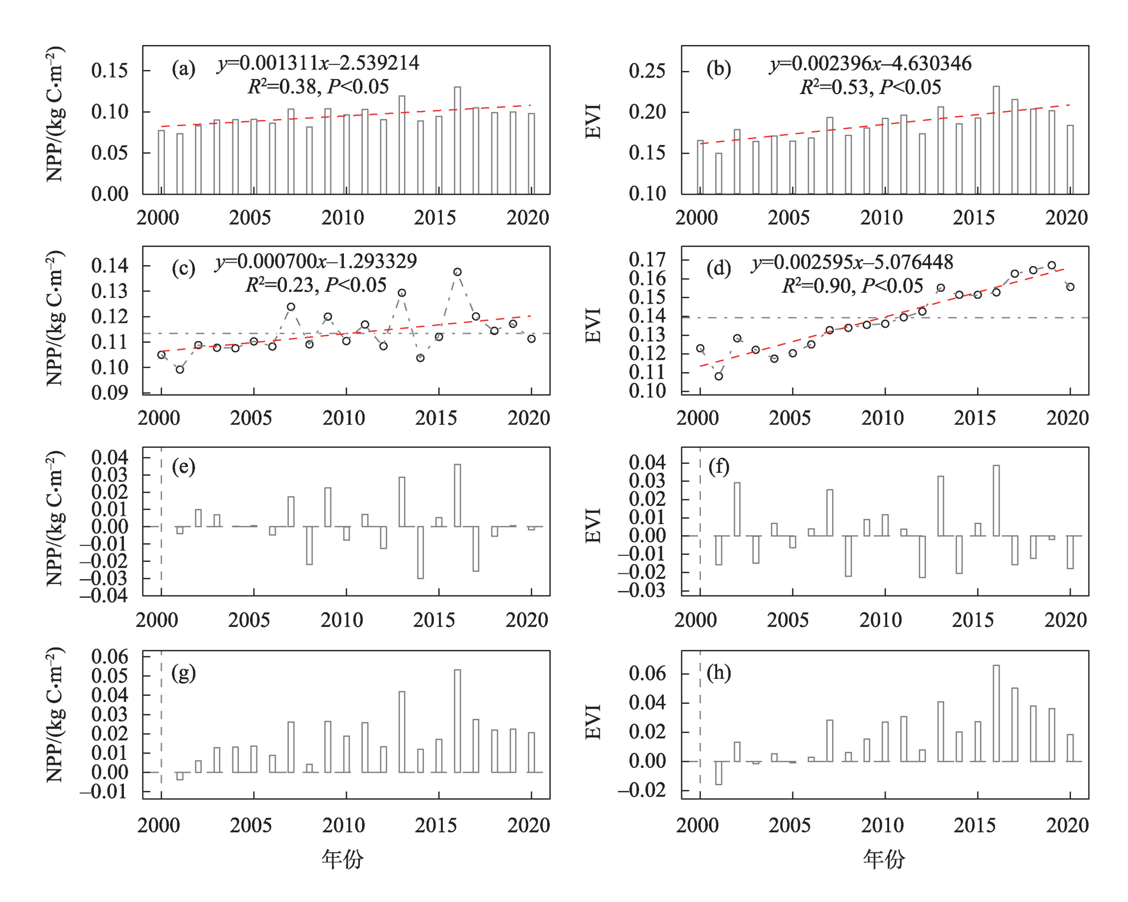
$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{2}$$

式中：r_{xy}为变量x、y之间的单相关系数；x_i为第i年草地植被NPP（EVI）；y_i为第i年气温（降水）；$\bar{x}$为草地植被NPP（EVI）均值；$\bar{y}$为气温（降水）均值，r_{xy}的取值范围[-1,1]，当$r_{xy}>0$，变量x、y相关关系表现为正相关，当$r_{xy}<0$呈负相关，$|r_{xy}|$取值越大相关性越高。采用t检验开展显著性检验。

2 结果与分析

2.1 昌吉州草地时空动态

2.1.1 草地时序变化 2000—2020年，昌吉州草地（NPP、EVI）表现为显著递增趋势（k>0，P<0.05）（图2a，图2b），并伴有明显的年际波动（P<0.05）（图2e，图2f）；2016年后草地NPP、EVI为逐年递减，2016年是昌吉州草地变化的重要拐点（图2）。草地NPP、EVI均值分别为0.095 kg C·m^{-2}、0.186，相较于2000年（NPP=0.077 kg C·m^{-2}、EVI=0.166），2020年草地NPP（0.099 kg C·m^{-2}）、EVI（0.194）分别增长了0.022 kg C·m^{-2}、0.028，增长率28.57%、16.87%。总体来看，2000—2016年草地NPP的年际波动呈逐年扩大趋势，草地EVI维持在高位的年际波动；2016年后，草地NPP、EVI的年际波动急剧降低，NPP表现为低位振荡趋势（图2e，图2f））。草地NPP最高值0.131 kg C·m^{-2}（2016年），最低值0.073 kg C·m^{-2}（2001



注：(a)、(b)为2000—2020年昌吉州草地NPP、EVI时序变化；(c)、(d)为2000—2020年昌吉州草地植被NPP、EVI空间异质性变化；(e)、(f)为2001—2020年草地植被NPP、EVI分别与前一年比较；(g)、(h)为2001—2020年草地植被NPP、EVI分别与2000年比较。

图2 2000—2020年昌吉州草地NPP、EVI时序变化

Fig. 2 NPP and EVI timing changes for grassland in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000 to 2020

年);草地EVI最低值0.150(2001年),最高值0.232(2016年)。

2000—2020年昌吉州草地NPP、EVI空间异质性(即空间标准差)均表现为显著增加并且扩大的趋势(k>0,P<0.05);2000—2020年草地EVI的空间差异急剧扩大,但年际间的差异较小,然而,草地NPP的空间差异逐年扩大;草地EVI(R^2=0.90)的空间异质性拟合优度高于NPP(R^2=0.23)(图2c,图2d)。草地NPP、EVI空间差异均值分别为0.113 kg C·m^{-2}、0.140,最低值0.099 kg C·m^{-2}(2001年)、0.108(2001年),最高值0.138 kg C·m^{-2}(2016年)、0.167(2019年)。总体来看,2007—2013年草地NPP空间异质性表现为高位波动,2016年草地NPP空间异质性达到最高值;草地EVI空间差异具有时段分异特征,2010年为重要拐点;2010年之前为逐渐接近研究时段的平均值,2010后逐年高于均值。

为深入理解昌吉州草地时序变化,将草地NPP、EVI分别与2000年相比。结果显示,草地NPP、EVI总体为递增趋势(图2g,图2h);相较于2000年,草地NPP在2016年达到研究时段的最高值,2000—2016年草地NPP表现为波动递增趋势;近5 a草地NPP呈递减趋势,但仍高于2000年草地NPP(图2g)。尽管草地EVI表现为类似于NPP的趋势,然而相较于2000年,2003—2006年草地EVI变化较小,2001年的草地EVI为负增长(图2h)。

2.1.2　草地空间分布格局及其年际变化趋势　2000—2020年昌吉州草地植被NPP与EVI空间分布格局具有差异(图3)。草地植被NPP随海拔升高而递增,高值(>0.30 kg C·m^{-2})区域分布在天山北坡山区,低值(0.15 kg C·m^{-2})区位于准噶尔盆地(图3a);EVI高值区集中在山区、绿洲边缘,低值区位于天山北坡山麓带与古尔班通古特沙漠南缘(图3b)。草地植被NPP<0.15 kg C·m^{-2}的面积占全州草地总面积的79.55%,分布于天山北坡山麓带以北、古尔班通古特沙漠的南缘(图3a);草地植被NPP>0.15 kg C·m^{-2}的占比为20.45%,是天山北坡禁牧与草畜平衡的重点实施区域(图3a);EVI<0.15的占比为62.83%,EVI>0.15(占比37.17%)既有集中连片分布的区域,也有分散孤立分布的斑块(图3b)。

为进一步探讨草地植被NPP、EVI的空间分布格局,以NPP分级为子区,分别统计了EVI的均值、标准差、最小值与最大值等(表1)。结果显示,随着NPP的增大,子区内EVI最低值、均值逐渐增加,同时EVI的变化范围总体上变现为递减;然而,EVI的标准差没有随NPP增加而表现出一致的趋势;在NPP>0.50 kg C·m^{-2}区域,EVI的空间异质性(即标准差为0.12)高于其余子区。NPP<0.05 kg C·m^{-2}(占比37.37%)覆盖的面积最大,在此范围内EVI均值0.10,EVI变化范围0.76,远高于其余NPP子区;然而,该子区的标准差(0.03 kg C·m^{-2})低于其余子区。

为深入了解近20 a昌吉州草地植被的空间变化,在像元尺度上开展显著性检验,量化2000—2020年草地植被NPP、EVI的空间变化趋势;基于地理信息系统原理开展空间分析,产生了20种草地植被NPP、EVI的空间变化格局(图4)。可以看出,占昌吉州草地总面积65.01%的草地NPP表现为显著递增($Slope$>0,P<0.05),面积占比21.93%的草地EVI呈显著递增;经叠加分析后,占比15.88%的草地植被NPP、EVI均表现为显著递增,占比37.10%的草地NPP表现为显著递增、EVI呈递增趋势($Slope$>0,

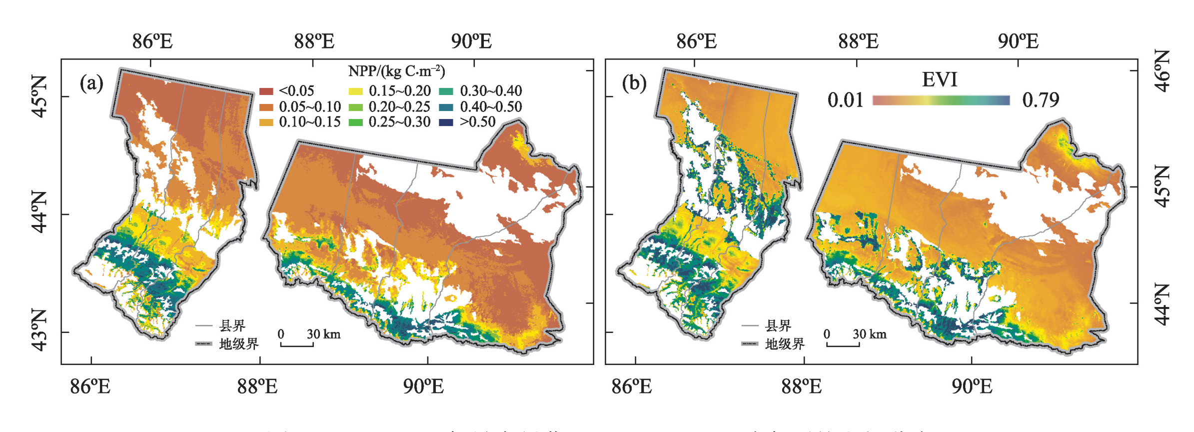


图3　2000—2020年昌吉州草地NPP(a)、EVI(b)多年平均空间分布

Fig. 3　Mean average grassland NPP (a) and EVI (b) of Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000−2020

表1 昌吉州草地植被NPP分区内EVI相关指标统计

Tab. 1 Statistics of indicators for EVI in grassland vegetation NPP sub-zone in Chanagji Hui Autonomous Precfeture

NPP分区/(kg C·m⁻²)	占比/%	最低值	最高值	平均值	标准差
< 0.05	37.37	0.01	0.78	0.1	0.03
0.05~0.10	30.9	0.04	0.78	0.17	0.11
0.10~0.15	11.28	0.06	0.76	0.22	0.11
0.15~0.20	6.55	0.15	0.73	0.29	0.11
0.20~0.25	3.56	0.16	0.7	0.33	0.09
0.25~0.30	2.82	0.21	0.68	0.36	0.07
0.30~0.40	4.35	0.22	0.71	0.41	0.06
0.40~0.50	2.24	0.23	0.77	0.48	0.09
> 0.50	0.93	0.27	0.79	0.47	0.12

P>0.05)，占比11.42%的草地NPP表现为显著递增、EVI呈递减趋势(*Slope*<0，*P*>0.05)(图4)。

草地NPP呈显著递减(*Slope*<0，*P*<0.05)的面积仅0.87%，集中分布在西天山山区(昌吉市与呼图壁县)；草地EVI呈显著递减的占比为1.27%。草地NPP、EVI均表现为递减趋势(*Slope*<0，*P*>0.05)的占比为0.68%，高于其余草地NPP(递减)与EVI格局组合。2000—2020年面积占比30.09%的草地NPP几乎没有变化(*Slope*=0)，主要分布于昌吉州各县市北部。在此范围内，占比18.94%的草地EVI表现为增加(*Slope*>0，*P*>0.05)，草地EVI呈显著递增、递减的占比分别为5.68%、5.36%，仅0.11%的草地EVI呈显著递减(图4)。

2.2 各类型草地时序变化

以昌吉州9个草地大类为研究子区，分别计算并可视化逐年各子区草地NPP、EVI的均值、标准差，分析各类型草地的时序动态特征(图5)；同时，针对各草地类型植被NPP、EVI，分别计算年际变化率并开展了显著性检验，从空间上量化各个类型草地的变化(表2)。结果显示，2000—2020年昌吉州低平地草甸类(图5a，图5b)、高寒草甸类(图5c，图5d)、高寒草原类(图5e，图5f)、温性草原化荒漠类(图5k，图5l))与温性荒漠类(图5q，图5r))草地植被NPP、EVI均为显著递增(*k*>0，*P*<0.05)，进一步在空间上NPP显著递增的面积占比分别高于85%，

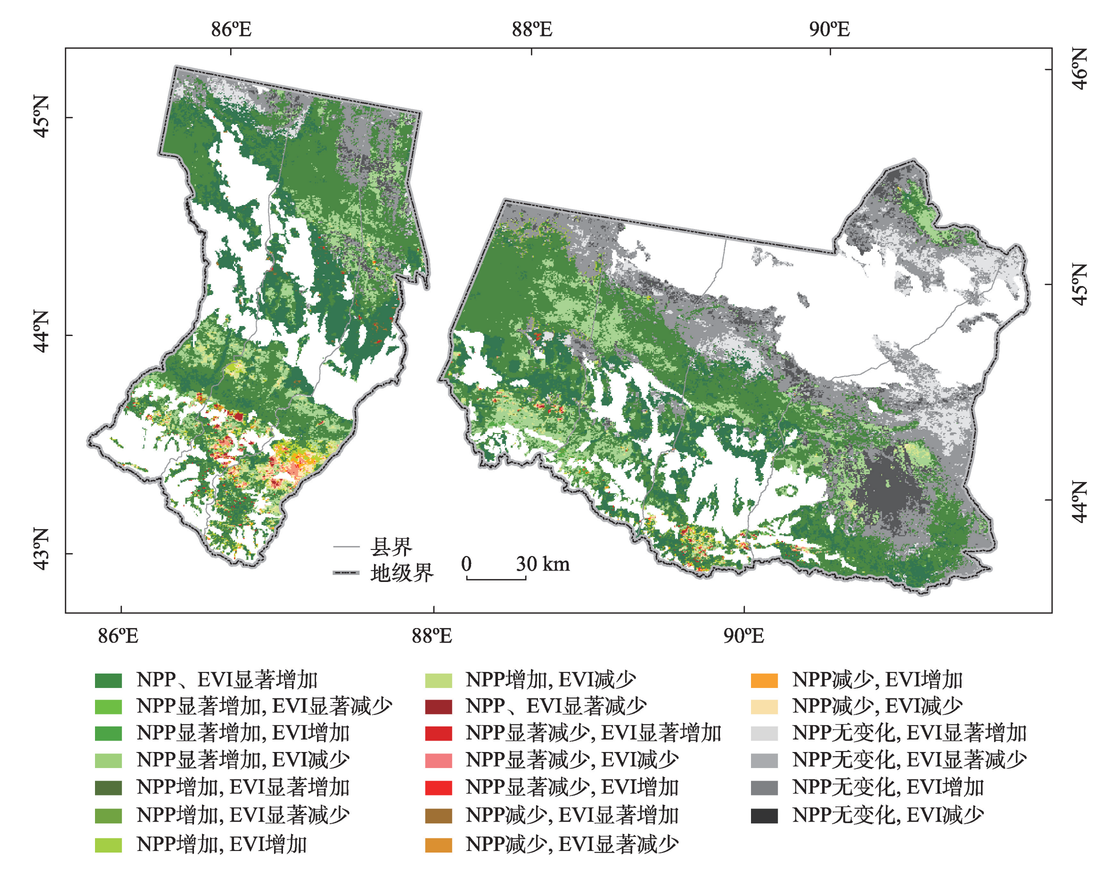
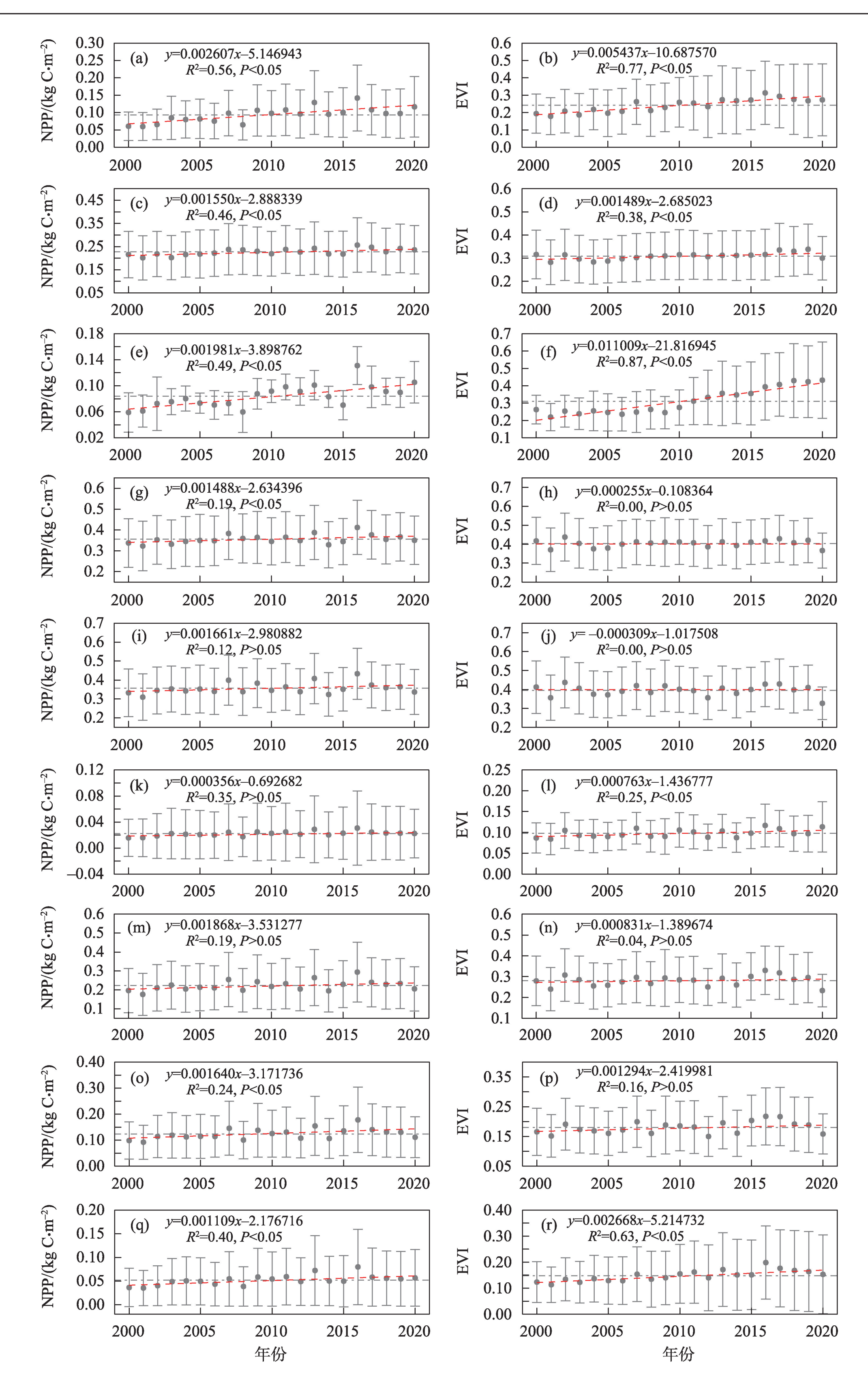


图4 2000—2020年昌吉州草地NPP、EVI年际变化及显著性检验

Fig. 4 Interannual variability of grassland NPP, EVI and its significance testing in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000−2020



注：低平地草甸类草地NPP(a)、EVI(b)，高寒草甸类草地NPP(c)、EVI(d)，高寒草原类草地NPP(e)、EVI(f)，山地草甸类草地NPP(g)、EVI(h)，温性草甸草原类草地NPP(i)、EVI(j)，温性草原化荒漠类草地NPP(k)、EVI(l)，温性草原类草地NPP(m)、EVI(n)，温性荒漠草原类草地NPP(o)、EVI(p)，温性荒漠类草地NPP(q)、EVI(r)。

图5　昌吉州各类型草地NPP、EVI时序变化

Fig. 5　Time series changes of grassland NPP, EVI in Changji Hui Autonomous Prefecture

表2 2000—2020年昌吉州各草地类型NPP、EVI变化的面积统计

Tab. 2 Percentage of grassland types' NPP, EVI in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000 to 2020 /%

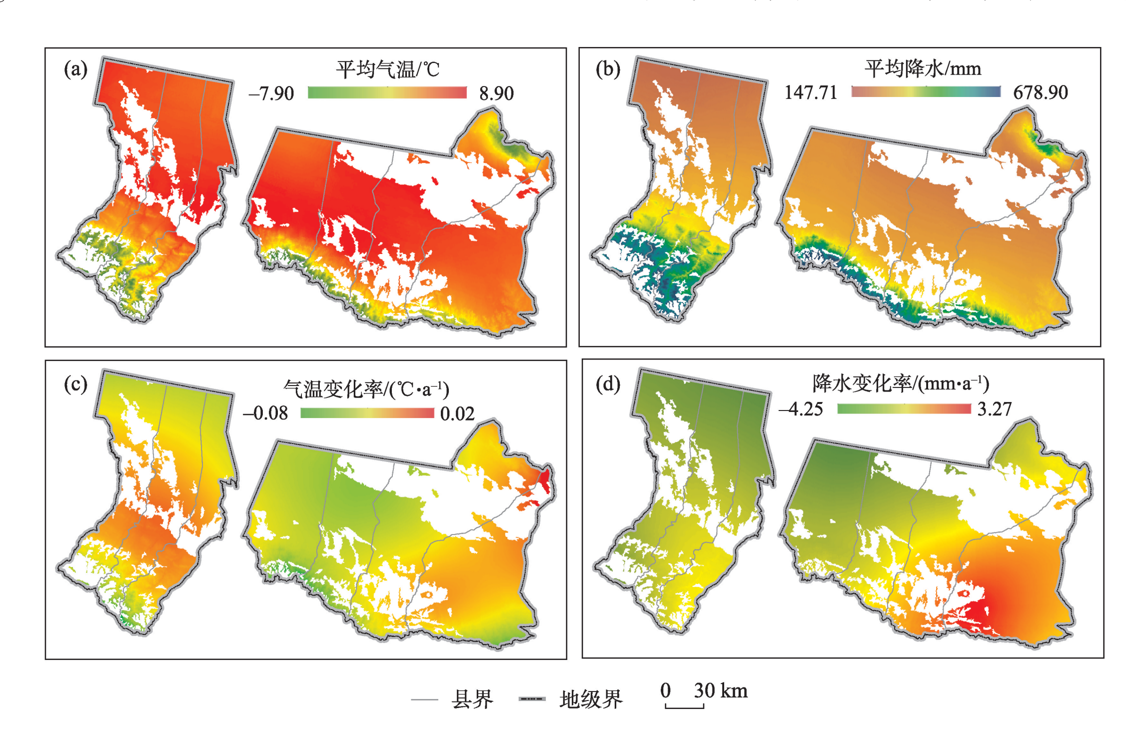
草地类型	NPP				EVI			
	显著增加	增加	显著减少	减少	显著增加	增加	显著减少	减少
低平地草甸类	98.42	1.27	0.05	0.27	31.31	37.07	0.79	30.83
高寒草甸类	88.15	7.62	1.69	2.55	25.93	53.68	2.96	17.43
高寒草原类	85.38	13.08	–	1.54	95.00	5.00	–	–
山地草甸类	78.30	11.20	5.24	5.26	13.52	48.07	5.89	32.52
温性草甸草原类	68.42	13.3	8.61	9.67	15.09	41.73	8.46	34.72
温性草原化荒漠类	99.85	0.15	–	–	9.06	70.58	0.12	20.24
温性草原类	77.64	9.02	6.32	7.02	17.79	51.47	1.45	29.29
温性荒漠草原类	93.08	4.04	0.47	2.41	15.02	68.26	0.49	16.23
温性荒漠类	96.77	2.64	0.22	0.37	20.67	60.97	0.47	17.89

EVI除高寒草原类均低于32%(表2);此外,以上5种草地类型植被NPP、EVI判定系数(R^2)不同,即拟合优度具有差异,显示了草地植被NPP、EVI发生了不同的年际振荡。

研究时段内,各个草地类型植被NPP的最高值大多出现在2016年(图5)。温性草甸草原类、温性草原类草地NPP、EVI仅具有年际间波动拟合优度(R^2)极低(图5i,图5j,图5m,图5n)。山地草甸类、温性荒漠草原类草地NPP总体为递增($k>0$, $P<0.05$)(图5g,图5o)。总体来看,昌吉州各类型草地NPP、EVI显著增加($Slope>0$, $P<0.05$)的面积占比高于显著减少($Slope<0$, $P<0.05$)的占比;NPP显著增加的占比高于同期增加的占比($Slope>0$, $P>0.05$);然而,EVI显著增加的面积占比仅高寒草原类高于同期增加的占比(表2)。

2.3 昌吉州草地时空动态与同期气温、降水的相关关系

2.3.1 昌吉州气温、降水时空变化特征 采用气温、降水基础数据,经可视化生成了2000—2020年研究区域气温、降水的空间平均分布格局(图6)。



注:(a)2000—2020年昌吉州年均气温分布,(b)2000—2020年昌吉州年均降水格局,(c)2000—2020年昌吉州年际间气温变化率分布,(d)2000—2020年昌吉州年际间降水变化率格局。

图6 2000—2020年昌吉州年均气温、降水空间分布与变化率

Fig. 6 Mean average and rate of change for temperature and precipitation in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000 to 2020

2000—2020年昌吉州平均气温6.09 ℃,最高气温为8.94 ℃,最低气温-7.91 ℃(图6a);降水均值267.45 mm,最高值678.90 mm,最低值147.71 mm(图6b);可以看出,平原区的气温高于山区,而山区的降水高于平原区;此外,持续升温的区域位于昌吉市、呼图壁县、玛纳斯县中部与南部,以及奇台县北部、木垒中部、北部(图6c);降水增加的区域集中在研究区的东南部(图6d)。

2.3.2 昌吉州草地植被与同期气温、降水的相关关系　采用昌吉州草地NPP、EVI分别与同期气温、降水开展相关性分析及其显著性检验。总体来看,2000—2020年昌吉州草地NPP与同期气温、降水呈显著正相关($r_{xy}>0, P<0.05$)的面积占比分别为1.38%、17.65%,与气温、降水呈显著负相关($r_{xy}<0, P<0.05$)的占比为0.05%、0.04%;草地NPP与气温、降水呈正相关($r_{xy}>0, P>0.05$)的占比分别为35.34%、43.05%,与气温、降水呈负相关($r_{xy}<0, P>0.05$)占比分别为27.63%、3.53%(图7);结果显示,近20 a昌吉州气候变化有利于草地植被生长,同时NPP对降水的响应高于气温。EVI与气温、降水表现为显著正相关的占比分别为3.15%、29.17%,呈显著负相关的占比1.40%、0.53%;与气温、降水呈正相关的占比分别为56.10%、53.84%,呈负相关的占比为39.35%、16.46%(图8);研究时段内,昌吉州草地EVI与降水呈正相关的面积为同期气温的9.26倍,EVI对降水的响应高于气温。

2.3.3 各类型草地植被对气温、降水的响应　8种类型草地植被NPP、EVI(除高寒草原类)与降水表现为显著正相关($r_{xy}>0, P<0.05$)的占比大于同期与气温呈显著正相关的占比(表3,表4);NPP、EVI与气温、降水呈显著负相关($r_{xy}<0, P<0.05$)的占比均小于2.2%;低平地草甸类、高寒草原类、山地草甸类与温性草原类草地NPP与同期降水呈显著负相关的占比为0(表3,表4);结果显示近20 a各类草地对降水的响应明显高于同期气温。

山地草甸类(18.15%)与高寒草甸类(10.96%)

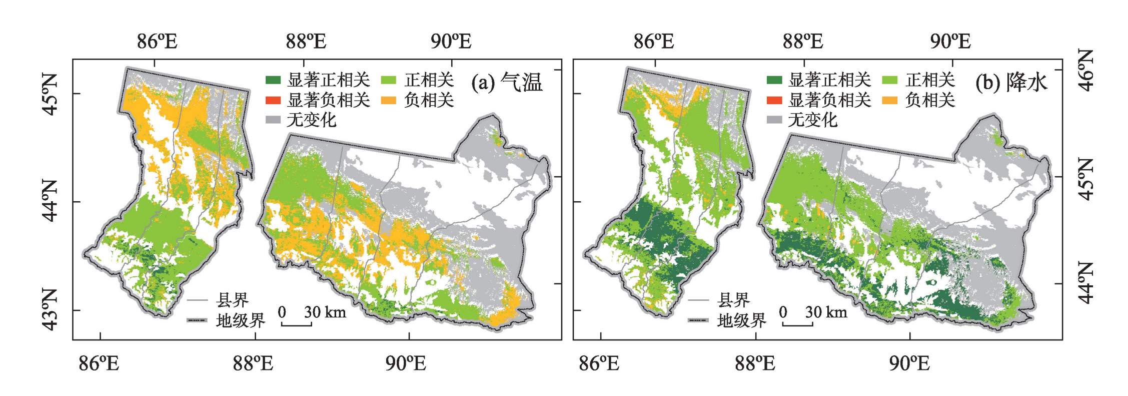


图7　2000—2020年昌吉州草地NPP与气温、降水的相关关系与显著性检验

Fig. 7　Correlation coefficients and significance testing between grassland NPP and temperature, precipitation in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000 to 2020

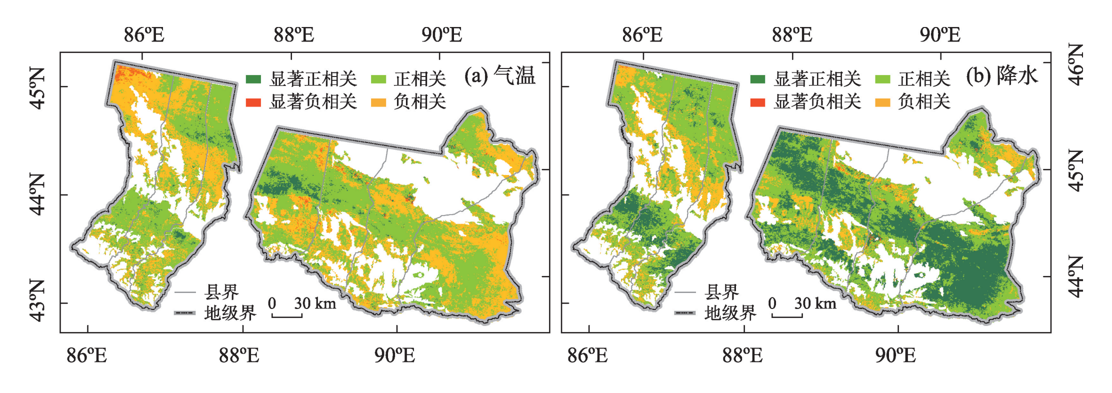


图8　2000—2020年昌吉州草地EVI与气温(a)、降水(b)的相关关系与显著性检验

Fig. 8　Correlation coefficients and significance testing between grassland EVI and temperature(a), precipitation(b) in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000 to 2020

表3 2000—2020年昌吉州草地类型植被NPP与气温、降水相关性及显著性检验的面积统计

Tab. 3 Percentage of correlation coefficients and significance testing between grassland types' NPP and temperature, precipitation in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000 to 2020 /%

草地类型	气温				降水			
	显著正相关	正相关	显著负相关	负相关	显著正相关	正相关	显著负相关	负相关
低平地草甸类	0.00	35.72	0.06	55.42	33.42	54.52	0.00	3.26
高寒草甸类	10.96	71.16	0.31	17.36	30.10	62.28	0.62	6.73
高寒草原类	0.00	15.00	0.00	85.00	0.00	97.50	0.00	2.50
山地草甸类	18.15	73.51	0.05	7.86	43.76	53.73	0.00	1.92
温性草甸草原类	5.99	80.99	0.00	10.54	75.81	20.88	0.08	0.17
温性草原化荒漠类	3.47	14.38	0.00	35.29	14.88	38.26	0.09	0.00
温性草原类	0.86	63.48	0.02	22.75	57.34	26.74	0.00	1.50
温性荒漠草原类	0.13	61.47	0.00	32.71	62.62	30.53	0.01	0.36
温性荒漠类	0.02	47.34	0.04	46.24	12.61	74.59	0.01	6.42

表4 2000—2020年昌吉州草地类型植被EVI与气温、降水相关性及显著性检验的面积统计

Tab. 4 Percentage of correlation coefficients and significance testing between grassland types' EVI and temperature, precipitation in Changji Hui Autonomous Prefecture from 2000 to 2020 /%

草地类型	气温				降水			
	显著正相关	正相关	显著负相关	负相关	显著正相关	正相关	显著负相关	负相关
低平地草甸类	0.67	52.47	0.36	46.50	45.83	36.89	0.70	16.57
高寒草甸类	2.52	47.52	2.17	47.79	3.64	59.95	0.92	35.47
高寒草原类	0.00	5.00	0.00	95.00	0.00	5.00	0.00	95.00
山地草甸类	2.57	61.42	0.96	35.05	12.51	69.19	0.25	18.05
温性草甸草原类	1.53	68.78	0.33	29.37	34.09	61.68	0.19	4.04
温性草原化荒漠类	3.82	55.11	0.86	40.22	27.92	66.20	0.83	5.05
温性草原类	0.40	50.31	0.18	49.11	33.05	49.18	0.54	17.23
温性荒漠草原类	1.67	54.57	0.48	43.29	41.22	51.34	0.25	7.19
温性荒漠类	4.2	57.81	1.70	36.48	30.62	53.67	0.49	15.21

草地NPP同气温呈显著正相关($r_{xy}<0$, $P<0.05$)的占比均大于10%,其余草地类型均低于6%(表3);温性草甸草原类(75.81%)、温性荒漠草原类(62.62%)与温性草原类(57.34%)草地NPP与降水呈正相关的占比分别高于其他类型草地;低平地草甸类与温性荒漠草原类草地植被EVI与同期降水呈显著正相关的占比分别为45.83%、41.22%,而其他类型占比均低于35%(表3)。可以看出,不同类型草地NPP、EVI对降水的响应程度具有差异。相较于高海拔草地EVI对降水的响应,低海拔草地更为显著。

3 讨 论

2000—2020年昌吉州草地植被具有年际振荡呈显著递增趋势($k>0$, $P<0.05$),这与陈春波等[28-29]研究得出的天山北坡草地植被的变化趋势一致;气候变化背景下,天山北坡表现为"暖湿化"趋势,昌吉州增温增湿的气候环境适宜草地植被生长[30-31]。草地植被NPP、EVI总体上随海拔升高而递增,具有垂直地带性,与天山北坡的水热分布一致,即气温随海拔升高而递增,降水随海拔升高在中山带(1600~2400 m)形成最大降水后递减,天山北坡的山地草地类分布在此范围内。赵苇康等[32]、杜梦洁等[33]的研究结果也证实了地形对山地草地植被分布的影响。

近20 a昌吉州草地植被空间异质性显著递增($k>0$, $P<0.05$),其中NPP具有强烈的年际振荡(图2c),EVI呈逐年递增(图2d)。尽管昌吉州气候表现为"增温增湿",然而各类型草地对气温、降水变化的响应具有差异。具体到草地类型,低平地草甸类、高寒草甸类、高寒草原类、温性草原化荒漠类与温性荒漠类草地(NPP、EVI)为波动增加;温性草甸

草原类与温性草原类草地（NPP、EVI）具有年际振荡（k>0，P>0.05）；关于山地草甸类与温性荒漠草原类，NPP为显著递增，EVI具有年际波动。总体来看，昌吉州气温、降水的时空变化迥异。具体而言，东南部表现为气温升高、降水增加，西天山北坡、山麓带及山前平原呈增温趋势（图6），高海拔区域气温升高及其引起的物候期延长，中山带（极端）降水频率增加；以上因素不同程度的影响着草地的空间异质性[34]。

昌吉州草地NPP、EVI与降水呈显著正相关（r_{xy}>0，P<0.05）的占比大于同期与气温呈显著正相关的占比，各类型草地NPP、EVI与降水呈显著正相关的占比大于同期气温。过去20 a，昌吉州平均气温、昼夜气温与极端气温显著上升[35]，高海拔山区变暖趋势明显尤其极端降水指数与海拔呈显著正相关[36]，水热条件（尤其降水）变化导致草地NPP、EVI对降水的响应具有差异。中山带、（亚）高山带增温有利于草地植被生长，如山地草甸类、高寒草甸类草地NPP与气温呈显著正相关的占比均高于10%。另一方面，山区水热组合及其变化影响草地植被生长，9类草地NPP、EVI与降水的相关关系比气温更强。尽管昌吉州气候经历着“暖湿化”过程，但降水依然是干旱区草地植被生长中最重要的限制性因子。

昌吉州山前平原草地NPP多年均值小于0.10 kg C·m^{-2}，然而EVI多年均值依然维持在高位（图3）。本研究认为，返青初期随着气温升高季节性融雪融化，降水以及季节性融水渗入土壤增加了土壤湿度，大量避旱植物类群-早春短命植物（生长发育快、光合效率高与生长周期短[37]）在水热条件（气温、土壤水分与根区土壤温度等）适宜时被唤醒，在夏季干热季来临前（4—6月）迅速完成萌芽、出苗、生长、结实与枯萎生活史。唐金等[38]、杨怡等[39]采用MVC法获取的古尔班通古特沙漠植被EVI也证实了昌吉州短命植物在4—6月有一个明显的物候期；段呈等[40]发现早春气温、冬春季节降水引起短命植物覆盖区域与覆盖度的显著增加；唐海萍等[41]发现准噶尔盆地短命植物物种数占到群落总物种数的50%以上；当水热充沛短命植物可形成旺盛层片其覆盖度高于其枯萎后的其他草地植物[23]。

植被NPP、EVI是草地资源、生态与健康监测的重要指标[42-43]，本研究采用MODIS（空间分辨率0.5 km）NPP、EVI定量草地时序变化、空间格局及其对气候变化的响应，能够为昌吉州及其各县市的草地生态监测、评价提供数据支撑[44]。然而，在相关性分析中，年度气温与年度降水对MVC法计算的EVI（代表年度最佳生长状况）具有“溢出效应”[45]，即草地植被EVI最大值通常发生在生长旺盛期，与之相关的应是物候初期至旺盛期的气温、降水等环境因子；此外，旺盛期至枯黄期的气温、降水等因子是否对MVC法计算的EVI有（显著）影响需进一步探讨。EVI、NDVI等长时序列植被指数客观表征了陆地生态系统植被长势及其时空变化，今后的研究应在像元尺度采用与EVI（MVC法）时序匹配的气温、降水数据开展相关性分析，客观定量EVI等指数与同期气温、降水的相关关系。

4 结 论

本研究采用MODIS NPP、EVI遥感影像与气温、降水及其相关辅助数据，在天山北坡昌吉州以天然草地作为研究对象，定量分析近20 a草地植被NPP、EVI的时空动态及其对气候变化的响应，结论如下：

（1）2000—2020年昌吉州草地植被NPP、EVI表现为显著递增（k>0，P<0.05）；2016年为重要拐点，随后草地NPP、EVI呈逐年减少。草地NPP空间异质性显著递增并且年际波动呈扩大趋势，EVI空间差异表现为逐年增加。

（2）2000—2020年昌吉州草地植被NPP、EVI空间分布具有差异。草地NPP随海拔升高而递增，占比65.01%的草地NPP为显著递增（$Slope$>0，P<0.05），占比30.01%的草地NPP无变化。地形、地貌是草地分布的重要影响因子，昌吉州天山北坡的地形发育了不同的水热组合条件进而孕育了多种类型的草地。

（3）草地EVI总体上随海拔升高而增加，占比21.93%的草地EVI呈显著递增趋势（$Slope$>0，P<0.05）；在天山北坡绿洲边缘、古尔班通古特沙漠南缘，草地NPP多年均值小于0.10 kg C·m^{-2}，但EVI多年均值较高；本研究发现采用年际NPP与MVC法提取的EVI，经可视化后能够识别短命植物的分布。

（4）昌吉州草地NPP、EVI与降水表现为显著正相关（r_{xy}>0，P<0.05）的面积占比大于同期气温，降水仍是干旱区草地的主要影响因子；但是，不同类型草地NPP、EVI对降水的响应具有差异。

致谢：此次天然草地监测与样地样方数据获取得到了中国科学院新疆生态与地理研究所基础前沿课题-干旱区林草资源一体化监测与预警的帮助，中国科学院新疆生态与地理研究所吴世新研究员的帮助，在此表示衷心的感谢！

参考文献(References)：

[1] 李飞, 李冰, 闫慧, 等. 草地遥感研究进展与展望[J]. 中国草地学报, 2022, 44(12): 87−99. [Li Fei, Li Bing, Yan Hui, et al. Advances and prospects of grassland remote sensing research[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(12): 87−99.]

[2] 钱芮, 段新宇, 杨海军, 等. 大兴安岭林草交错带草地退化成因分析及其应对策略[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(12): 1883−1896. [Qian Rui, Duan Xinyu, Yang Haijun, et al. Analysis of causes of forest-steppe ecotone degradation and countermeasures in the Greater Xing'an Range[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2022, 52(12): 1883−1896.]

[3] 胡宇霞, 龚吉蕊, 朱趁趁, 等. 基于生态系统服务簇的内蒙古荒漠草原生态系统服务的空间分布特征[J]. 草业学报, 2023, 32(4): 1−14. [Hu Yuxia, Gong Jirui, Zhu Chenchen, et al. Spatial distribution of ecosystem services in the desert steppe, Inner Mongolia based on ecosystem service bundles[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(4): 1−14.]

[4] 孙桂丽, 陆海燕, 禹明柱, 等. 天山北坡经济带生态脆弱性评价及驱动力分析[J]. 西南农业学报, 2022, 35(9): 2161−2170. [Sun Guili, Lu Haiyan, Yu Mingzhu, et al. Ecological vulnerability spatial-time distribution and driving forces analysis in the economic belt on the northern slope of Tianshan mountains[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(9): 2161−2170.]

[5] 孙智斌, 高敏华, 崔雪锋. 基于遥感与GIS的天山北坡经济带2000—2015年土地利用动态变化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 397−404. [Sun Zhibin, Gao Minhua, Cui Xuefeng, et al. Land use change in north slope economic zone of Tianshan mountain based on remote sensing and GIS from 2000−2015[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(3): 397−404.]

[6] 张雅, 尹小君, 王伟强, 等. 基于Landsat 8 OLI遥感影像的天山北坡草地地上生物量估算[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(6): 1012−1021. [Zhang Ya, Yin Xiaojun, Wang Weiqiang, et al. Estimation of grassland aboveground biomass using Landsat 8 OLI satellite image in the northern hillside of Tianshan mountain[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(6): 1012−1021.]

[7] 陈佼, 张丽. 天山北坡草地盖度高光谱遥感估算[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 30−39. [Chen Jiao, Zhang Li. Estimating grassland coverage based on hyperspectral remote sensing in the northern Tianshan mountains[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(1): 30−39.]

[8] 吐尔逊·艾山, 吐热尼古丽·阿木提, 买买提·沙吾提, 等. 天山北坡玛纳斯河流域草地长势遥感监测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 140−145. [Tuerxun Aishan, Tureniguli Amuti, Maimaiti Shawuti, et al. Grassland vitality monitoring based on remote sensing in Manas River Basin in northern slope of Tianshan mountain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 140−145.]

[9] 王永琪, 杜保军, 张树振, 等. 放牧对新疆天山山地草甸土壤团聚体和土壤呼吸潜力的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2729−2736. [Wang Yongqi, Du Baojun, Zhang Shuzhen, et al. Effects of grazing on soil aggregates and soil respiration potential in Tianshan mountain grassland, Xinjiang[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(10): 2729−2736.]

[10] 胡贵锋, 王新军, 常梦迪, 等. 评估放牧干扰对天山北坡土壤侵蚀及空间特征的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 13−21. [Hu Guifeng, Wang Xinjun, Chang Mengdi, et al. Assessment on the impact of grazing disturbance on spatial characteristics of soil erosion on the northern slope of Tianshan mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 13−21.]

[11] 杨晶晶, 吐尔逊娜依·热依木, 张青青, 等. 放牧强度对天山北坡中段山地草甸植被群落特征的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(8): 1953−1961. [Yang Jingjing, Tuerxunnayi Reyimu, Zhang Qingqing, et al. Effects of grazing intensity on plant community characteristics in mountain meadows in the middle section of the northern slope of the Tianshan mountains[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(8): 1953−1961.]

[12] 张青青, 安沙舟, 于辉, 等. 放牧对天山北坡山地草原生态系统土壤$\delta^{15}N$的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(7): 1260−1266. [Zhang Qingqing, An Shazhou, Yu Hui, et al. Impact of grazing on soil $\delta^{15}N$ of mountainous grassland ecosystems over the northern Tianshan mountains, China[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(7): 1260−1266.]

[13] 孙霞, 丁娓, 贾宏涛, 等. 模拟放牧对天山北坡草甸草原生态系统碳储量的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(3): 377−384. [Sun Xia, Ding Wei, Jia Hongtao, et al. Effect of simulated grazing on carbon storage of meadow grassland ecosystem in the north slope of Tianshan mountain[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(3): 377−384.]

[14] 丁娓, 孙霞, 贾宏涛, 等. 放牧强度对天山北坡草甸草原土壤有机碳的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4): 1596−1600. [Ding Wei, Sun Xia, Jia Hongtao, et al. Effect of grazing intensity on soil organic carbon in north slope of Tianshan mountain meadow grassland[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(4): 1596−1600.]

[15] 董乙强, 孙宗玖, 安沙舟, 等. 短期禁牧对天山北坡蒿类荒漠群落特征及其稳定性的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(5): 996−1003. [Dong Yiqiang, Sun Zongjiu, An Shazhou, et al. Effect of short-term grazing exclusion on community characteristics and stability in Artemisia desert on the northern slopes of the Tianshan

mountains[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(5): 996-1003.]

[16] 胡毅, 朱新萍, 贾宏涛, 等. 围栏封育对天山北坡草甸草原生态系统碳交换的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(3): 372-381. [Hu Yi, Zhu Xinping, Jia Hongtao, et al. Effects of fencing on ecosystem carbon exchange at meadow steppe in the northern slope of the Tianshan mountains[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(3): 372-381.]

[17] 范燕敏, 武红旗, 孙宗玖, 等. 围封对天山北坡荒漠草地土壤有机碳的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(1): 65-69. [Fan Yanmin, Wu Hongqi, Sun Zongjiu, et al. Effects of fencing on the soil organic carbon of desert grassland in the northern slope of Tianshan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(1): 65-69.]

[18] 哈里·阿力腾别克, 孙宗玖, 何盘星, 等. 封育对蒿类荒漠草地土壤氮素含量及其组分特征的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 222-230, 240. [Haili Alitengbieke, Sun Zongjiu, He Panxing, et al. Effects of grazing exclusion on soil nitrogen content and its component characteristics in *Sagebrush* desert grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 222-230, 240.]

[19] 杨峰, 李建龙, 钱育蓉, 等. 天山北坡典型退化草地植被覆盖度监测模型构建与评价[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1340-1348. [Yang Feng, Li Jianlong, Qian Yurong, et al. Estimating vegetation coverage of typical degraded grassland in the northern Tianshan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(8): 1340-1348.]

[20] 顾爱星, 范燕敏, 武红旗, 等. 天山北坡退化草地土壤环境与微生物数量的关系[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 116-123. [Gu Aixing, Fan Yanmin, Wu Hongqi, et al. Relationship between the number of three main microorganisms and the soil environment of degraded grassland on the north slope of the Tianshan Mountains [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(2): 116-123.]

[21] Liu H L, Zhu J Z, Jin M L, et al. Characteristic analysis of *Seriphidium transillense* (Poljak.) Poljak. desert grasslands at different degraded stages in the northern Tianshan Mountains[J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(4): 419-427.

[22] 罗麟. 新疆草地资源介绍(一)[J]. 新疆畜牧业, 1990, 6(5): 32-36. [Luo Lin. Introduction to Xinjiang Grassland Resources(I)[J]. Xinjiang Xu Mu Ye, 1990, 6(5): 32-36.]

[23] 许鹏. 新疆草地资源及其利用[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993. [Xu Peng. Xinjiang Grassland Resources and Its Utilization[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Publishing House, 1993.]

[24] Tian J Q, Zhu X L, Chen J, et al. Improving the accuracy of spring phenology detection by optimally smoothing satellite vegetation index time series based on local cloud frequency[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 180: 29-44.

[25] 赵鹏, 陈桃, 王茜, 等. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系统NPP影响的定量分析[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51-62. [Zhao Peng, Chen Tao, Wang Qian, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on grassland ecosystem NPP in Xinjiang[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 51-62.]

[26] 陈春波, 李刚勇. 1981—2020年昆仑山-阿尔金山草地NDVI时空变化及其对气温、降水的响应[J]. 中国草地学报, 2023, 45(2): 13-25. [Chen Chunbo, Li Gangyong. Temporal and spatial variation of grassland NDVI in Kunlun Mountains, Altun Mountains and its responses to temperature and precipitation from 1981 through 2020[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(2): 13-25.]

[27] 陈宸, 井长青, 邢文渊, 等. 近20年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(3): 1-14. [Chen Chen, Jing Changqing, Xing Wenyuan, et al. Desert grassland dynamics in the last 20 years and its response to climate change in Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(3): 1-14.]

[28] 陈春波, 李刚勇, 彭建. 近20 a新疆天然草地NPP时空分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 522-534. [Chen Chunbo, Li Gangyong, Peng Jian. Spatialtemporal analysis of net primary productivity for natural grassland in Xinjiang in the past 20 years[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 522-534.]

[29] 陈春波, 李刚勇, 彭建. 1981—2018年新疆草地归一化植被指数时空特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1537-1552. [Chen Chunbo, Li Gangyong, Peng Jian. Spatio-temporal characteristics of Xinjiang grassland NDVI and its response to climate change from 1981 to 2018[J]. Acta Ecological Sinica, 2023, 43(4): 1537-1552.]

[30] Xue J, Wang Y Y, Teng H F, et al. Dynamics of vegetation greenness and its response to climate change in Xinjiang over the past two decades[J]. Remote Sensing, 2021, 13(20): 4063.

[31] Zheng L L, Xu J H, Li A H, et al. Increasing control of climate warming on the greening of alpine pastures in central Asia[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 105: 102606.

[32] 赵苇康, 井长青, 陈宸. 新疆天然草地时空变化及其对气候因子的响应[J/OL]. 中国农业科技导报, 2022-11-21. doi: 10.13304/j.nykjdb.2021.0931. [Zhao Weikang, Jing Changqing, Chen Chen. Temporal and spatial variation of Xinjiang natural grassland and their responses to climate factors[J/OL]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022-11-21. doi: 10.13304/j.nykjdb.2021. 0931.]

[33] 杜梦洁, 郑江华, 任璇, 等. 地形对新疆昌吉州草地净初级生产力分布格局的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4789-4799. [Du Mengjie, Zheng Jianghua, Ren Xuan, et al. Effects of topography on the distribution pattern of net primary productivity of grassland in Changji Prefecture, Xinjiang[J]. Acta Ecological Sinica, 2018, 38(13): 4789-4799.]

[34] 陈宸, 井长青, 赵苇康, 等. 新疆草地质量对气候变化的响应及其变化趋势[J]. 草业学报, 2022, 31(12): 1-16. [Chen Chen, Jing Changqing, Zhao Weikang, et al. Grassland quality response to climate change in Xinjiang and predicted future trends[J]. Acta

Prataculturae Sinica, 2022, 31(12): 1-16.]

[35] 申孝军, 张笑培, 姚宝林, 等. 气候变化对新疆膜下滴灌花生适宜播期的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 107-115. [Shen Xiaojun, Zhang Xiaopei, Yao Baolin, et al. Effects of climate change on the suitable sowing dates for peanut under mulched drip irrigation in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(2): 107-115.]

[36] 邬晓丹, 罗敏, 孟凡浩, 等. 气候暖湿化背景下新疆极端气候事件时空演变特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1695-1705. [Wu Xiaodan, Luo Min, Meng Fanhao, et al. New characteristics of spatio-temporal evolution of extreme climate events in Xinjiang under the background of warm and humid climate[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1695-1705.]

[37] 李岩, 何学敏, 张雪妮, 等. 早春短命植物鸢尾蒜和准噶尔鸢尾蒜的光合途径[J]. 西北植物学报, 2020, 40(8): 1339-1346. [Li Yan, He Xuemin, Zhang Xueni, et al. Photosynthetic pathway of early spring ephemeral plants *Ixiolirion songaricum* and *Ixiolirion wtataricum*[J]. Act Boreali- Occidentalia Sinica, 2020, 40(8): 1339-1346.]

[38] 唐金, 李霞, 牛婷. 古尔班通古特沙漠南缘近10年NDVI变化趋势与气象因子的关系[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 171-174. [Tang Jin, Li Xia, Niu ting. Relationship between NDVI and climate factors in south Gurbantunggut Desert in past 10 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 171-174.]

[39] 杨怡, 吴世新, 庄庆威, 等. 2000—2018年古尔班通古特沙漠EVI时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1512-1520. [Yang Yi, Wu Shixin, Zhuang Qingwei, et al. Spatiotemporal change of EVI in the Gurbantunggut Desert from 2000 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1512-1520.]

[40] 段呈, 吴玲, 王绍明, 等. 近30年古尔班通古特沙漠短命植物的时空格局[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2642-2652. [Duan Cheng, Wu Ling, Wang Shaoming, et al. Analysis of spatio-temporal patterns of ephemeral plants in the Gurbantünggüt Desert over the last 30 years[J]. Acta Ecological Sinica, 2017, 37(8): 2642-2652.]

[41] 唐海萍, 袁素芬. 新疆短命植物[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021. [Tang Haiping, Yuan Sufen. Ephemeral Plants in Xinjiang, China[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.]

[42] 陈春波, 彭建, 李刚勇. 新疆草地生态系统健康评价体系构建[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 270-281. [Chen Chunbo, Peng Jian, Li Gangyong. Evaluating ecosystem health in the grasslands of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 270-281.]

[43] 李刚勇, 陈春波, 李均力, 等. 低空无人机遥感在草原监测评价中的应用进展[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 1-13. [Li Gangyong, Chen Chunbo, Li Junli, et al. Advances in applying low-altitude unmanned aerial vehicle remote sensing in grassland ecological monitoring[J]. Acta Ecological Sinica, 2023, 43(16): 1-13.]

[44] 陈春波, 李刚勇, 彭建, 等. 新疆草地生态健康智能监测网络体系构建[J]. 草业科学, 2023, 40(5): 1420-1434. [Chen Chunbo, Li Gangyong, Peng Jian, et al. The systematic construction of a smart network for ecological health observation of grassland in Xinjiang [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(5): 1420-1434.]

[45] Yan J J, Zhang G P, Ling H B, et al. Comparison of time-integrated NDVI and annual maximum NDVI for assessing grassland dynamics[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108611.

Spatiotemporal dynamics of grassland vegetation and its responses to climate change in Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang

CHEN Chunbo[1,2], LI Junli[1,2], ZHAO Yan[3], XIA Jiang[3], TIAN Weitao[3], LI Chaofeng[4]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Joint Laboratory for Remote Sensing Observation of Grassland Ecosystem in Arid Area, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 3. Grassland Work Station of Changji Prefecture, Changji 831100, Xinjiang, China; 4. Ruichang Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830049, Xinjiang, China)

Abstract: As the most widespread ecosystem on Earth, grassland is vital for maintaining ecological security, sustainability, and human well-being. In this study, we used systemic methods of maximum synthesis, regression analysis, and partial correlation analysis to investigate the spatiotemporal dynamics of grassland and its responses to temperature and precipitation on the northern slope of the Tianshan Mountains in Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang, from 2000 to 2020. The research was based on remote-sensed time series images (e.g., MODIS NPP and EVI) and related auxiliary data. The results indicate a significant increase in grassland NPP and EVI from 2000 to 2020, with temporal fluctuations. However, after 2016, both NPP, and EVI declined year over year. Over the past 20 years, the mean average NPP, and EVI of grassland vegetation were 0.095 kg $C \cdot m^{-2}$ and 0.186, respectively. In 2020, grassland NPP (0.099 kg $C \cdot m^{-2}$) and EVI (0.194) increased by 28.57% and 16.87%, respectively, compared to their values in 2000 (NPP: 0.077 kg $C \cdot m^{-2}$; EVI: 0.166). The spatial heterogeneity of grassland vegetation NPP increased substantially and showed a trend toward expansion, while the spatial heterogeneity of grassland EVI increased annually. The range of variation observed during this research was 0.038 kg $C \cdot m^{-2}$ for NPP and 0.059 for EVI. Overall, the spatial distribution of grassland NPP and EVI was generally coherent, but variations also existed. Grassland NPP and EVI showed an upward trend with altitude, with an elevated EVI along the oasis edge and the southern edge of the Gurbantunggut Desert. In this study, we suggest that abundant water and heat induce the formation of vigorous layers of short-lived plants, resulting in higher coverage than other grassland plants after withering. These short-lived plants begin their life cycle in early spring, when hydrothermal conditions (e.g., temperature, soil moisture, and root zone soil temperature) are favorable, and they complete their germination, growth, fruiting, and withering phases from April to June. The area percentages of NPP (65.01%) and EVI (21.93%) showed a significant increasing trend on the northern slope of Tianshan Mountains in the Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang, over the last 20 years. The proportion of vegetation NPP and EVI in the 9 grassland types showed a significant positive correlation with precipitation, which was much greater than that with temperature during the same period, confirming that precipitation is the major factor affecting grassland vegetation. Furthermore, the reactions of each grassland vegetation type (e.g., NPP and EVI) to precipitation varied. While precipitation remained a key driver for grassland, moderate warming, especially at high altitudes, was found to be suitable for the growth of grassland vegetation. These findings provide theoretical references for evaluating grassland ecological health and degradation, as well as the high-quality development of grassland on the northern slope of Tianshan Mountains in the Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang.

Keywords: grasslands; ephemeral plants; warm humidification; MODIS NPP; MODIS EVI; spatial-temporal dynamics; the northern slope of Tianshan Mountains